

激光焊接参数对变间隙 TC4 钛合金板焊接接头成形质量及性能的影响

郑超¹, 胡生双¹, 姜毅¹, 张兵宪¹, 高晓颖¹, 张颖云¹, 欧阳德来²

(1. 中航西安飞机工业集团股份有限公司, 陕西西安 710089;

2. 南昌航空大学材料科学与工程学院, 江西南昌 330063)

摘要: 采用钣金成形和机械切割的TC4钛合金蒙皮板材装配后往往出现间隙不均匀现象, 这种间隙不均匀的焊件激光焊接后会产生未焊透或焊漏等缺陷。为提高变间隙TC4钛合金蒙皮板材激光焊接成形质量, 对TC4钛合金蒙皮板材进行了变间隙的自熔激光焊接工艺试验, 研究了线性变化激光功率和离焦量对焊接接头成形质量、微观组织及力学性能的影响。结果表明, 单一调节激光功率(0.85~1.25 kW)或离焦量(5~8 mm)不能获得变间隙TC4钛合金板材良好成形质量的焊接接头。从获得成形质量优良焊接接头考虑, 应采用前后激光功率由1.09 kW变化为1.15 kW, 离焦量由+5 mm变化为+6 mm的焊接工艺参数为宜, 焊接接头抗拉强度可达1113.1 MPa, 最高伸长率可达13.3%。焊缝组织为马氏体组织, 靠近熔合线区域为晶粒粗大 β 柱状晶, 晶内为针状马氏体, 远离熔合线的热影响区仅有加热痕迹, 未发生组织转变。接头显微硬度分布呈现焊缝>热影响区>母材的分布规律。焊接接头室温拉伸断裂位置在母材, 断口形貌存在大量韧窝和少许脆性撕裂棱, 断裂形式为塑性和脆性的混合断口。

关键词: 激光焊接; 变间隙TC4钛合金板; 成形质量; 性能

作者简介:

郑超(1982-), 女, 高级工程师, 主要研究方向为复合材料和特种工艺制造。
E-mail: zhengchao82@126.com

通信作者:

欧阳德来, 男, 教授。E-mail: ouyangdelai@163.com

中图分类号: TG456.7

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2025)10-1392-07

基金项目:

江西省自然科学基金项目(20242BAB25216)。

收稿日期:

2025-05-12 收到初稿,

2025-06-18 收到修订稿。

TC4钛合金作为一种典型 $\alpha + \beta$ 两相钛合金, 具有良好的焊接性和机械加工性能, 在飞机机身蒙皮及口盖等大型结构中广泛使用^[1-4]。

航空复杂钛合金薄壁组件普遍采用激光焊接成形^[5-11]。张世伟等人^[5]采用YAG激光焊接方法对3 mm厚TC4钛合金进行了对接焊接, 发现激光焊接TC4钛合金能够获得成形良好的焊接接头, 无裂纹及气孔等缺陷; 焊缝组织为典型的网篮组织, 由大量的 α' 马氏体相和少量的高温残留 β 相构成, 热影响区为交错排布的针状 α' 马氏体。刘甲等^[12]对16 mm厚TC4钛合金板进行了激光焊接, 认为TC4激光焊接焊缝组织主要为针状 α' 相、马氏体 α 、少量针状 α 和 β 相, 可以看到粗大的高温 β 相晶界, 热影响区由针状 α' 相、块状 α 相、马氏体 α 和少量 β 相组成, 部分区域针状 α' 相+ β 相呈现网篮特征; 接头平均抗拉强度为965 MPa, 为韧性断裂。尽管国内外学者对钛合金激光焊接成形工艺和质量控制做了较多研究, 获得了优良的焊接接头。然而, 采用钣金成形和机械切割的焊前钛合金薄壁组件会出现待焊边沿区域直线度极差, 且凹凸不平的现象, 致使装配后焊件的间隙不均匀。这种间隙不均匀的焊件激光焊接后往往会产生未焊透或焊漏等缺陷^[10, 13-15]。为解决装配后焊件间隙不均匀带来的焊接缺陷问题, 一种方法是人工测量间隙并分段标志, 根据不同的间隙采用不同的焊接技术和规范, 但这会导致生产效率降低, 焊缝接头数量急剧增加; 另一种方法是采用间隙自适应自动化焊接技术, 在不同间隙之间实现渐进梯度转换, 在自熔焊和熔丝焊之间实现送丝和停丝之间的自动转换, 可消除焊缝之间接头、降低缺陷, 是目前航空钛合金薄壁件焊接成形的技术主流趋势。本文的目的是探索自熔激光焊接参数对变间隙TC4钛合金板焊接接头成形质量及性能的影响, 为TC4钛合金蒙皮间隙自适应自动化焊接技术研究提供技术支撑。

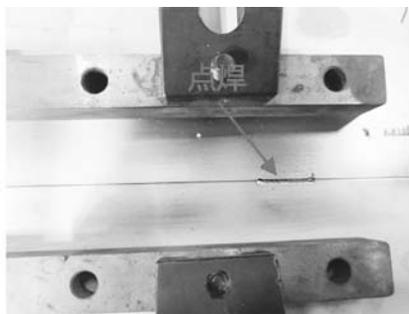
为此,本文采用龙门激光加工系统,对TC4钛合金蒙皮板材进行了变间隙的自熔激光焊接,研究了线性变化激光功率和离焦量对焊接接头成形质量、微观组织及力学性能的影响,优化了良好焊接接头成形质量的激光功率和离焦量参数,这对TC4钛合金蒙皮的间隙自适应自动化焊接技术具有重要的工程实际价值和意义。

1 试验材料及方法

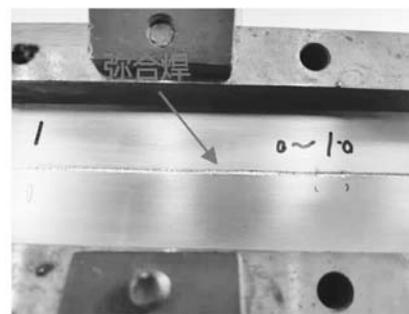
试验材料为1.2 mm厚的TC4钛合金蒙皮板材,化学成分见表1,尺寸为500 mm×100 mm×1.2 mm。TC4钛合金在高温下化学活性很强,在空气中钛与氧极易形成致密的、与基体结合良好的氧化薄膜。为了提高焊缝的成形质量,避免焊接缺陷的形成,同时保证试验的准确性,在进行试验之前需要严格清理试件表面,进行去油和除氧化膜处理。首先用特殊砂纸对基板表面进行打磨,去除表面的锈迹和污渍,再用丙酮对其表面进行擦拭,待室温下干燥后进行焊接。

表1 TC4钛合金的化学成分要求
Tab. 1 Chemical composition requirements of TC4 titanium alloy

Al	V	Fe	C	N	H	O	Ti
5.5~6.8	3.5~4.5	≤0.30	≤0.10	≤0.05	≤0.015	≤0.20	余量



(a) 点焊



(b) 弥合焊

图1 焊接流程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the welding process

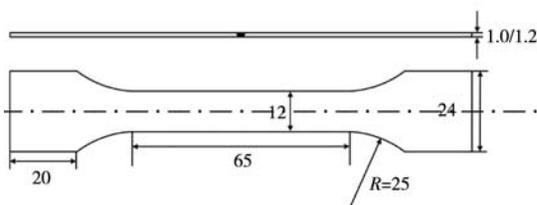


图2 室温拉伸试样尺寸

Fig. 2 Specimen sizes of room temperature tensile test

激光焊接试验采用龙门激光加工系统,依托数控龙门移动机床、机器人和激光焊接头等部件,实现双光束激光焊接功能。对接结构变间隙单激光束自熔焊接主要涉及焊前清洗、试片装配、焊接程序设定及焊接工位确定等。为了避免焊接过程的变形对间隙的影响,采用点焊和弥合脉冲焊的方式保持间隙的大小,如图1所示。

通过调整激光功率、离焦量等工艺参数来获得不同的焊缝熔池形态。将板材调节间隙从一端0到另一端0.2 mm线性变化。为了避免焊接过程的变形对间隙的影响,采用点焊方式保持间隙大小。之后进行激光功率和离焦量从一端至另一端线性变化的自熔激光焊接,激光功率范围为1 090~1 310 W,离焦量为+3~+8 mm。

激光焊接完成后,焊接接头经切割、打磨、抛光和腐蚀等过程制得金相制样,腐蚀液采用Kroll试剂(体积配比为HF:HNO₃:H₂O=2:1:20),腐蚀时间为30 s。金相组织观察与分析在MR-5000光学显微镜上进行。根据GB 4342—84标准进行维氏硬度检测,硬度检测加载载荷为1 kg,保压时间为15 s。试样检测前进行抛光处理,自焊缝附近母材位置开始,向水平另一侧每隔0.5 mm取一个测试点,直取到焊缝另一端相同水平位置。根据标准GB/T 2651—2008进行室温拉伸性能测试,拉伸试样尺寸如图2所示。室温拉伸试验在CMT 5105电子万能试验机上进行,拉伸位移速度2 mm/min,

试验环境温度25 ℃。

2 试验结果与分析

2.1 激光焊接工艺参数对焊缝宏观成形质量的影响

为分析焊接工艺参数维持不变是否适应线性变化间隙TC4钛合金板材的激光焊接,采用恒定焊接工艺参数(激光功率1.2 kW、离焦量+5、焊接速度1.2 m/min、

激光入射角度 90°)对前后线性变化间隙 $0\sim 0.2$ mm的TC4钛合金板材进行对接焊接(重复两次焊接,编号分别为B1和B2),宏观形貌如图3所示。从图3可看出,当焊接工艺参数不变时,B1试板焊透情况前后不均匀,B2试板在间隙为 $0.15\sim 0.2$ mm处出现焊漏的情况,因而前后维持不变的焊接工艺参数无法适应线性变化的间隙,会导致局部未焊透或焊漏等缺陷。

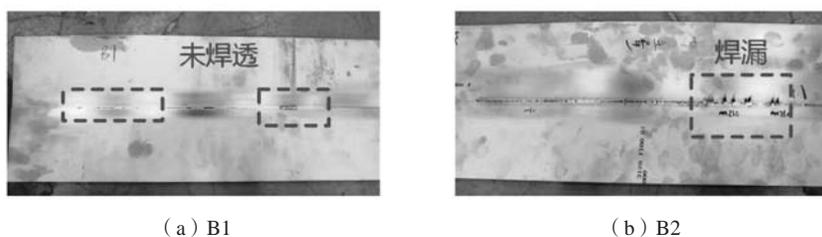


图3 激光焊接工艺参数不变时焊缝宏观形貌

Fig. 3 Macroscopic morphologies of the weld seam at invariable laser welding process parameters



图4 激光焊接离焦量保持不变激光功率线性变化时焊缝宏观形貌

Fig. 4 Macroscopic morphologies of the weld seam at changing laser power and constant defocus

保持激光功率前后不变,从焊接开始到结束线性变化离焦量的方式来适应间隙的线性变化。焊接两块试板,保持激光功率为 1.25 kW,离焦量从前端的 $+5$ 变化为后端的 $+8$,编号为B5;保持激光功率为 1.3 kW,离焦量从前端的 $+5$ 变化为后端的 $+8$ 和离焦量,编号为

B6。激光焊接后的宏观形貌如图5所示。从焊缝背面看,B5试样焊缝前端大量未焊透,而后端间隙较大处却形成了漂亮的焊缝。B6试样依旧前端未焊透。这说明离焦量的线性变化能够适应后端间隙较大的焊缝,只需要将前端焊透即可。

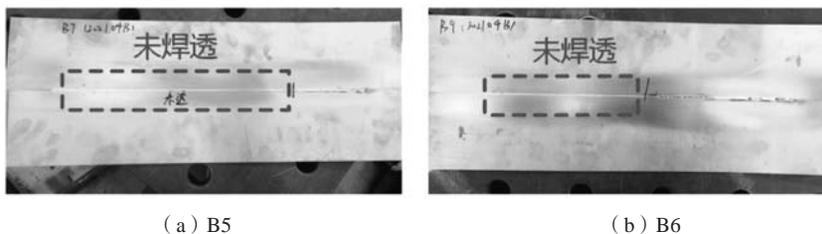


图5 在激光功率保持不变离焦量线性变化时焊缝宏观形貌

Fig. 5 Macroscopic morphologies of the weld seam at changing defocus and constant laser power

进一步采用激光功率和离焦量前后都线性变化的方式去焊接,以获得成形质量良好的焊接接头。前后激光功率由 1.29 kW变化为 1.31 kW,离焦量由 $+7$ mm变化为 $+8$ mm,编号为B7,焊接接头宏观形貌如图6

(a)、(b)所示。可以看出,焊缝正面背面成形都良好,没有出现任何焊接缺陷。但由于该参数的焊接接头成形质量重复性不好,因此继续降低功率和离焦量。调整前后激光功率由 1.09 kW变化为 1.15 kW,离

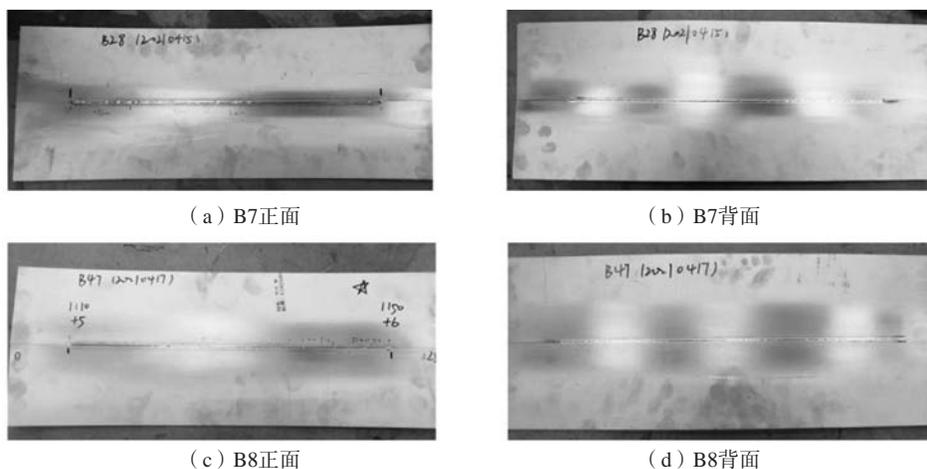


图6 激光功率和离焦量都线性变化的焊缝宏观形貌

Fig. 6 Macroscopic morphologies of the weld seam at changing defocus and laser power

焦量由+5 mm变化为+6 mm, 试样编号为B8, 焊接接头宏观形貌如图6(c)、(d)所示。可以看出, 接头焊缝表面呈淡黄色, 焊缝成形良好、较均匀, 试板背面已焊透。这说明单一调整激光焊接功率或离焦量均不能很好地焊接变间距板材。激光功率代表着焊接能量, 离焦量代表着能量聚集程度。焊件前端间距小, 激光功率和离焦量应较低。较低激光功率避免了焊漏缺陷, 较低离焦量使激光能量集中, 避免了焊不透缺陷。焊件后端间距大, 需要更大激光能量焊合焊缝, 故激光功率和离焦量应较高。

2.2 焊接接头微观组织

对编号B8试样(激光功率由1.09 kW变化为1.15 kW,

离焦量由+5 mm变化为+6 mm)进行金相组织观察, 如图7所示。一般说来, 激光焊接过程中激光对TC4钛合金进行加热, 在温度约为 $(975 \pm 20)^\circ\text{C}$ 时, 会发生 α 向 β 的同素异形体转变, α 相全部转化为 β 相, 随着温度进一步升高至液相线, TC4钛合金熔化为液态, 当激光热源远离后, 温度降低, 当温度低至固相线则生成 β 相, 在继续冷却过程中, 发生固态相变, 会由 β 相中析出新相^[6]。从图7可以看出, 焊接接头分为焊缝、热影响区(HAZ)及母材三个区域。在靠近熔合线的区域 β 柱状晶晶粒粗大, 晶内为针状马氏体, 但是马氏体的数量与焊缝中马氏体相比数量较少, 尺寸更加细小, 而远离熔合线的热影响区仅有加热痕迹, 未发生组织转变, 见图7(a)。由于热影响区最高加

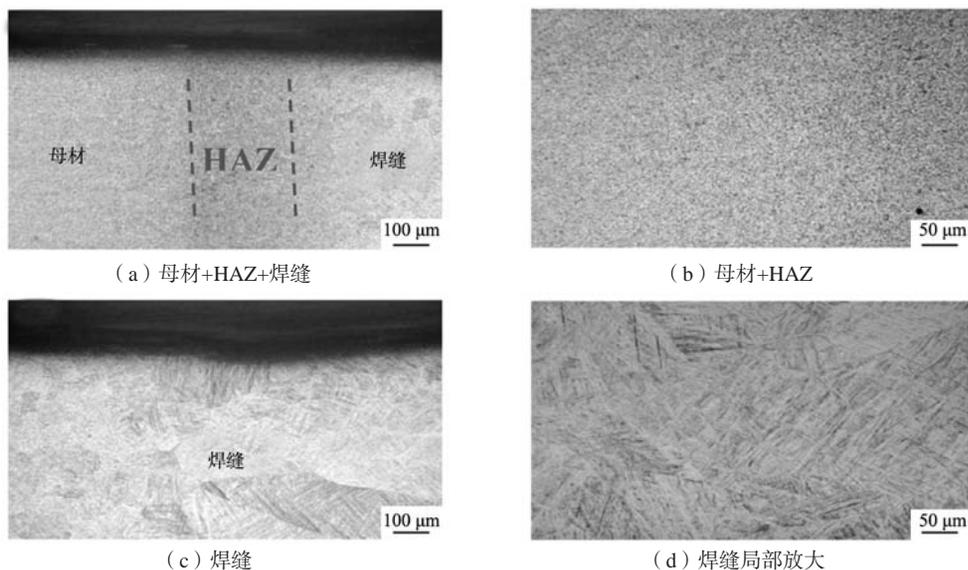


图7 变间隙结构自熔激光焊接头微观组织

Fig. 7 Microstructures of the self melting laser welded joint with variable gap

热温度较低且加热速度较快，大都在 β 转变温度之下，在加热峰值超过相变点温度产生 α 到 β 相变的组织较少，大部分 α 相在焊接过程中还保持原有状态，故此区域马氏体相变相对较少，见图7(b)。焊缝组织为马氏体组织，且原始粗大 β 晶界清晰可见，见图7(c)、(d)。徐培全等人^[16]对厚度为2 mm的TC4钛合金板进行激光焊接，焊缝显微组织为 α 相+ β 相+针状 α' 马氏体的混合组织。本试验焊缝组织为马氏体组织，可能因为试验采取的板材较薄(1.2 mm)，焊接过程中焊缝冷却速度大， β 相直接转变成马氏体组织。

2.3 焊接接头力学性能

对前后激光功率由1.09 kW变化为1.15 kW、离焦量由+5 mm变化为+6 mm自熔焊焊接接头(编号B8)进行硬度测试，从焊缝中心向母材方向的硬度分布如图8所示。从图8可以看出，焊缝区域显微硬度在HV_{1.0} 390左右，母材显微硬度在HV_{1.0} 350左右。自熔焊焊接接头从焊缝中心向母材方向的硬度分布曲线呈现出中间高两边低的特征，也即接头焊缝显微硬度>热影响区显微硬度>母材显微硬度的分布规律。这是由于焊缝中心由针状马氏体的形成，导致焊缝中心硬度较高，而热影响区由于温度相对较低，马氏体含量较少，硬度要略低于焊缝，这一点与国内外学者对TC4钛合金激光焊接接头硬度分布规律观察结果是相一致的。例如，张世伟等人^[5]对3 mm厚TC4钛合金进行了激光焊接，认为焊接接头的显微硬度呈驼峰分布，从母材到热影响区逐渐增加，焊缝内部区域的平均硬度约为HV385，均大于母材(约为HV360)，并认为原因是在热循环作用下焊缝凝固时发生了马氏体转变， β 相向针状 α' 相转变所致。刘甲等人^[12]对16 mm厚TC4钛合金板进行了激光焊接，也发现了硬度分布的相似规律，母材平均显微硬度值最低，焊缝和热影响区域硬度值相近，形成典型的“软+硬+软”三明治式硬度分布结构。

进一步对编号B8试样的激光自熔焊焊接接头进行室温拉伸性能测试，取样位置为试样两头取两个编

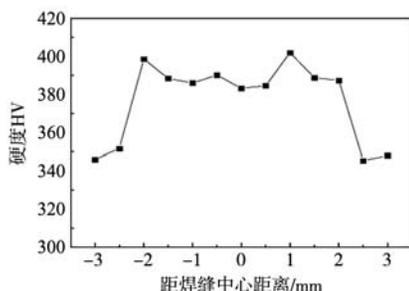


图8 自熔焊焊接接头从焊缝中心向母材方向的硬度分布
Fig. 8 Hardness distribution of the self fusion welded joints along from the center of the weld to base metal

号分别为1#和4#，中间位置取两个编号分别为2#和3#，共测试4个位置的室温拉伸性能，测试结果如表2所示。从表2可看出，焊接接头室温拉伸断裂位置均在母材。拉伸强度均在1 004~1 113 MPa，最大抗拉强度1 113.1 MPa，最高伸长率13.3%。值得说明的是，试样两端(1#和4#)的强度和伸长率均比中间位置的强度和伸长率略为降低，这可能原因是试样开始端间距较小而末端间距较大，使焊接缺陷多于中间部位。整体而言，激光功率为1.09~1.15 kW、焊接速度为1.2 m/min、离焦量为5~6 mm时，焊缝质量较优，焊接接头具有优异的塑韧性及抗拉性能。

表2 自熔焊试样室温拉伸测试结果

Tab. 2 Tensile test results of the self welding specimens

编号	试样厚度/mm	抗拉强度/MPa	伸长率/%	断裂位置
1	1.2	1 003.9	9.3	母材
2		1 103.6	13.2	母材
3		1 113.1	13.3	母材
4		1 094.4	8.5	母材

图9为自熔焊试样在50倍下的拉伸断口形貌。可以看出，从整体形貌上观察，各区域断口形貌差异不大，但凹凸不平，存在少量明显的剪切特征和解理特征。断口的纤维区存在凸起，并且能观察到大量韧窝区域。

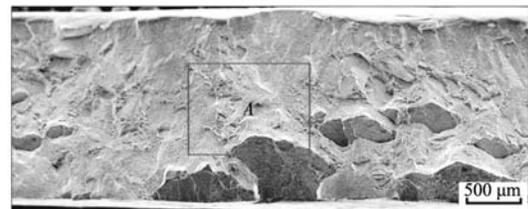


图9 自熔焊试样在50倍下的拉伸断口形貌
Fig. 9 Tensile fracture morphology of the self welding specimens at 50 times magnification

对图9中A区域进行局部放大观察，如图10所示。从图10可看出，A区域存在大量的韧窝区，其中夹杂少许的脆性断裂棱，断裂主要由塑性和脆性综合作用的结果。从图10(a)、(b)中两个区域的高倍SEM可以看出，微观断口中存在很多的等轴韧窝，单个韧窝面积较小，深度较浅，同时韧窝中还有大量微孔的存在，是典型的韧窝延性断口，并且存在明显的断裂棱，断口颜色更加灰暗，韧窝在三个自熔焊拉伸断口中表现为深度最浅且韧窝边缘更加尖锐。

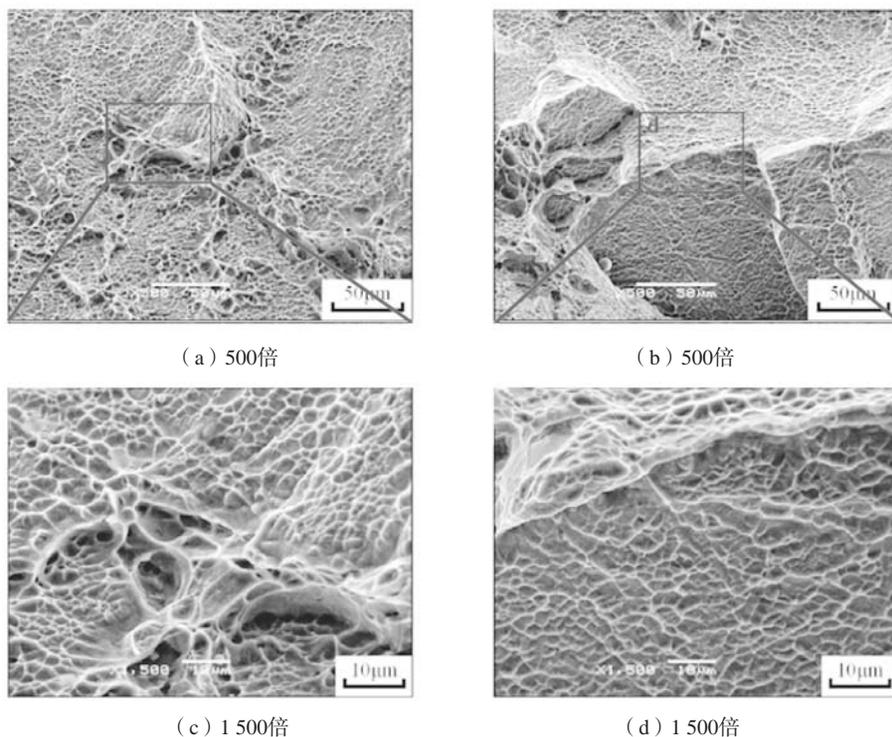


图10 自熔焊试样在图9中A区域拉伸断口形貌局部放大

Fig. 10 Localized enlargement of the tensile fracture morphology of the utogenous specimen in marked A of Fig. 9

3 结论

(1) 变间隙TC4钛合金板材自熔激光焊接不能通过单一调节激光功率(0.85~1.25 kW)或离焦量(5~8 mm)而获得良好成形质量的焊接接头;

(2) 从获得成形质量优良焊接接头考虑,板厚2.0 mm、线性间隙0~1.2 mm的板材,应采用前后激光功率由1.09 kW变化为1.15 kW,离焦量由+5 mm变化为+6 mm的焊接工艺参数为宜;

(3) 变间隙TC4钛合金板材自熔激光焊接焊缝组织为马氏体组织,靠近熔合线区域为 β 柱状晶晶粒粗大,晶内为针状马氏体,远离熔合线的热影响区仅有加热痕迹,未发生组织转变;

(4) 接头显微硬度分布呈现焊缝>热影响区>母材的分布规律,焊接接头室温拉伸断裂位置在母材,最高抗拉强度达1 113.1 MPa,最大伸长率达13.3%,断口形貌存在大量韧窝和少许脆性撕裂棱。

参考文献:

- [1] 杨晓华, 韩颖杰, 谢洪志, 等. TC4钛合金复杂曲面蒙皮热成形失稳缺陷及消除方法[J]. 塑性工程学报, 2024, 31(10): 78-84.
- [2] 徐少可, 李谨, 张可可, 等. TC4钛合金超声滚压表层残余应力仿真分析[J]. 机械制造, 2024, 62(10): 60-64.
- [3] 王美晨, 储双杰, 梁高飞, 等. TC4钛合金热轧过程中组织演变和性能控制机理研究及展望[J]. 塑性工程学报, 2024, 31(9): 1-22.
- [4] 吴晗, 周忠智, 赵忠华, 等. TC4钛合金T形接头双光束激光焊接组织与力学性能研究[J]. 电焊机, 2024, 54(4): 154-158.
- [5] 张世伟, 王珏, 佻好学, 等. TC4钛合金激光自熔焊焊接组织及性能[J]. 焊接, 2024(6): 33-39.
- [6] 魏玉顺, 马青军, 武鹏博, 等. TC4钛合金激光焊接技术研究进展[J]. 电焊机, 2023, 53(8): 55-66.
- [7] 徐楷昕, 雷振, 黄瑞生, 等. 40 mm厚TC4钛合金窄间隙激光填丝焊接接头组织及性能[J]. 材料导报, 2022, 36(2): 162-167.
- [8] 张群兵, 东拓, 谭猛猛, 等. TC17钛合金激光焊接接头微观组织和力学性能[J]. 机械制造文摘(焊接分册), 2024(2): 1-5.
- [9] 高睿. 激光焊接对TC6钛合金组织及性能的影响[J]. 世界有色金属, 2018(5): 227-228.
- [10] 周春洋, 王权, 罗敬文. 机器人光纤激光焊接TA15钛合金的工艺研究[J]. 机械制造, 2016, 54(9): 92-94.

- [11] 张增光, 史吉鹏, 王新宇, 等. 退火温度对Ti60钛合金激光焊接接头组织与力学性能的影响 [J]. 金属热处理, 2024, 49 (5): 130-135.
- [12] 刘甲, 雷小伟, 余巍, 等. TC4钛合金中厚板激光焊接接头组织及性能研究 [J]. 热加工工艺, 2023, 52 (11): 19-24.
- [13] 邱俊斌, 张永康, 罗敬文. 机器人光纤激光焊接TC4钛合金的工艺研究 [J]. 应用激光, 2013, 33 (4): 426-429.
- [14] 方乃文, 黄瑞生, 武鹏博, 等. 钛合金窄间隙激光填丝焊接工艺及接头组织性能分析 [J]. 材料导报, 2023, 37 (10): 190-197.
- [15] 张攀, 王湘江. 窄间隙激光焊接研究现状及进展 [J]. 热加工工艺, 2019, 48 (9): 9-12.
- [16] 徐培全, 马春伟, 李永平, 等. TC4钛合金激光焊缝成形与显微组织分析 [J]. 热加工工艺, 2012, 41 (11): 207-209.

Effect of Laser Welding Parameters on the Forming Quality and Performance of Variable Gap Plate Welding Joints of TC4 Titanium Alloy

ZHENG Chao¹, HU Sheng-shuang¹, JIANG Yi¹, ZHANG Bing-xian¹, GAO Xiao-ying¹, ZHANG Ying-yun¹, OUYANG De-lai²

(1. AVIC Xi'an Aircraft Industry Group Co., Ltd., Xi'an 710089, Shaanxi, China; 2. School of Material Science and Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, Jiangxi, China)

Abstract:

Uneven gap of TC4 titanium alloy skin plate with sheet metal forming and mechanical cutting will occur frequently after assembly. The weldment with uneven gap will produce defects such as incomplete penetration or burn-through after laser welding. In order to improve the laser welding forming quality of TC4 titanium alloy skin plate with variable gap, self-melting laser welding of TC4 titanium alloy skin plates with variable gap was carried out. The effects of linearly varying laser power and defocus on the forming quality, microstructure, and mechanical properties of the welded joints were investigated. The results indicated that solely adjusting the laser power or defocus cannot achieve a welded joint with good forming quality for variable-gap TC4 titanium alloy sheets. Considering obtaining welded joints with excellent forming quality, it is advisable to adopt welding process parameters where the laser power was varied from 1.09 kW to 1.15 kW, and the defocus distance was adjusted from +5 mm to +6 mm. With these parameters, the tensile strength of the welded joint reached 1 113.1 MPa, and the elongation was 13.3%. The microstructure of weld seam was martensitic structure. Near the fusion line, the microstructure within coarse β grains consisted of acicular martensite. The microstructure at the heat affected zone faring the bond line only showed heating traces and no structural transformation. The microhardness distribution of the joint showed a distribution pattern of weld seam>heat affected zone>base metal. The tensile fracture of the welded joint at room temperature was located in the base metal, with numerous ductile dimples and a few brittle tearing edges on the fracture surface. The fracture mode is a combination of ductility and brittleness.

Key words:

laser welding; TC4 titanium alloy skin plates with variable gap; forming quality; mechanical properties